

第2章

UWB通信を利用したリアルタイム無線画像転送システムの開発

製品コンセプト，仕様決定の過程から実装・評価まで

佐々木勇治

本稿では，筆者ら（サイレックス・テクノロジー）が開発した無線画像転送システムを取り上げる．本システムはUWB通信技術を用いて，JPEG-2000のディジタル・データをリアルタイムでネットワークに配信するものである．このようなシステムでは，画質や伝送速度，接続の安定性などの要求仕様を満たす必要がある．ここでは，こうした課題をクリアするために筆者らがどのようにして通信方式やデバイス，システム構成を決定していったのかその過程を紹介する．また，開発したシステムの実機評価をもとに，製品化への課題をまとめる．（編集部）

筆者らはUWB（ultra wideband）通信を利用したリアルタイム無線画像転送システム（UWB-XGAシステム）を開発しました．このプロジェクトはもともと「無線プロジェクタ・アダプタ」という製品構想で始まりました．会議室でプレゼンテーションを行うとき，話し手がノート・パソコンを抱えてプロジェクタの前に移動し，ビデオ・ケーブルをねじ込み，ファンクション・キーを押して外部モニタ出力へ切り替える，この一連の作業を行うようすを見るたびに，「あのケーブルがなくなったらさぞ便利だろう」と考えたのが発端です．

1 製品仕様の決定――DS-UWBを選んだわけ

この構想が持ち上がった当時（2004年）は，伝送速度が11Mbpsの無線LAN（IEEE 802.11b）が普及期を迎えており，また伝送速度54MbpsのIEEE 802.11gやIEEE 802.11aの量産品も市場に登場しつつありました．これら無線LANを用いた無線プロジェクタ・アダプタもすでに数種類発売されており，ある程度の市場性が見込めることは確実と思えました．

● 新規性と実現性のバランスをとり，DS-UWBに賭ける

一方，次世代の高速無線通信規格として「UWB」ということばが業界を騒がせており，その標準化はIEEE 802.15.3aとして策定中と報道されていました．標準の候補としては複数の方式が提唱されており，筆者らのプロジェクトが発足した時点では，米国Freescale Semiconductor社の提唱するDS-UWB（direct sequence-ultra wideband）方式とMBOA（現在WiMedia Alliance）の提唱するMB-OFDM（mul-ti band-orthogonal frequency division modulation）方式が最終候補としてしのぎを削っている，というところまでは情報を把握していました．

MB-OFDM方式は，当時米国Intel社が提唱したUSBの無線化仕様であるWireless USB注1の基本仕様として採用することが発表されていました．参入メーカも多く，業界全体に勢いが感じられる一方で，試作品も含めてチップ開発が進んでおらず，実現性に一抹の不安を残していました．一方，DS-UWBはFreescale Semiconductor社1社の提唱であるものの，民生機器向けUWBチップセットの草分けである米国XtremeSpectrum社注2直系の技術を保有して

注1：その後，Certified Wireless USBとしてUSB-IF（Implementers Forum）で規格が策定された．
注2：同社は2003年11月に米国Motorola社（現在のFreescale Semiconductor社）に買収された．

KeyWord　DS-UWB，IEEE 802.11b，MB-OFDM，JPEG-2000，XS110，KS8695P，RB5C634A，EP1C6F256，AD9882A，ADV7125

表1　通信方式の検討

通信方式	IEEE 802.11	UWB（DS-UWB）
プラス要因	●すでに普及しており，実績のある技術である ●パソコン側の無線機能がすでに市販されており，プロジェクタ側を作るだけでよい	●「日本初のUWB採用製品」というインパクトが狙える ●既存UWBチップ「XS110」で伝送速度110Mbps，次世代チップでは220Mbps～660Mbpsと発表されており，速度面でIEEE 802.11に大差をつけられる可能性がある ●UWBはピコネット方式であり，モード設定やSSID/WEP設定などの煩雑さがない
マイナス要因	●IEEE 802.11対応の無線LANプロジェクタはすでに先行製品が発売されており，新規性に乏しい ●IEEE 802.11a/gの伝送速度は54Mbps，実効スループットは25Mbps程度にとどまる ●動作モード（アドホック/インフラストラクチャ），セキュリティ設定（SSID，WEP/WPA設定，パスワードや証明書など）が煩雑である	●いまだ発展途上の技術であり，実績がない ●標準規格や法制上の問題が残されている ●パソコン側，プロジェクタ側をセットで販売する必要がある

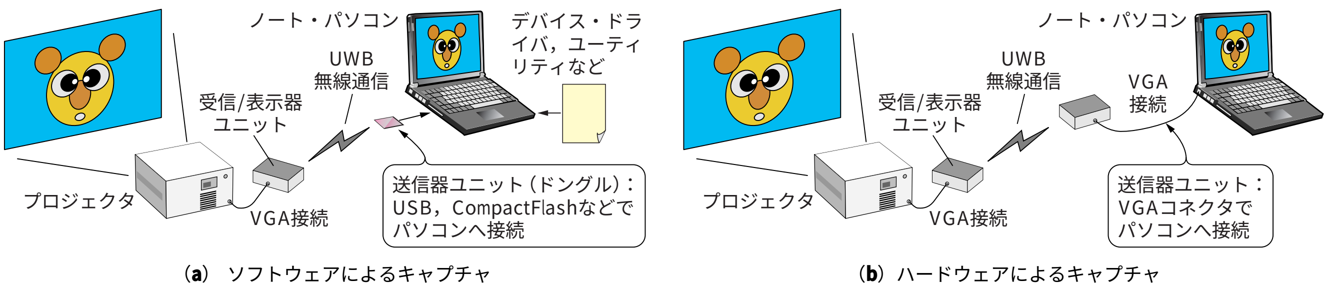


図1　キャプチャ方式の検討
表示画像をキャプチャし，ネットワークに送信するだけでソフトウェアにかなりの負担がかかる．今回は送受信ともに専用ハードウェアを用意した．

いました．すでに量産仕様のチップセットである「XS110」がリリースされているなど，実現性において先行していることがうかがえました．

既存の市場を考えてIEEE 802.11の無線LANベースにするか，将来性に賭けてMB-OFDMのUWBにするか，両者の中間をとってDS-UWBにするか，企画，営業，ソフトウェア/ハードウェア開発の担当者を交えて議論を重ねた結果，DS-UWBを採用することを決定しました（**表1**）．

● 送受信側ともに専用ハードウェアを用意

要求性能は当時のノート・パソコンやオフィス向けプロジェクタで一般的だった，1,024×768ピクセル（いわゆるXGA）の画像サイズ，30フレーム/s（目標値）のフレーム速度としました．ただし，比較的動きの少ないプレゼンテーションを主な用途とすることから許容下限を15フレーム/sと設定しました．

受信側（表示側）には専用ハードウェアが必要ですが，送信側（キャプチャ側）はパソコンのバス（USBやmini-PCI，SDカードなど）にUWBアダプタを装着し，ソフトウェアで表示画像をキャプチャして送信する構成も考えられました．しかし，

- 当時パソコンに装着できるUWBアダプタの入手性が不明瞭だった
- 表示画像をキャプチャし，ネットワークに送信するだけでソフトウェアに相当の負荷がかかり，パソコンの使用体感速度を損なう（**図1**）
- Windows Media Playerのような動画表示は原則としてキャプチャできない仕様になっている

などの問題があり，今回は送受信側ともに専用ハードウェアを用意し，アナログVGA出力信号を用いて接続する構成としました．

● 必要性能を出すためJPEG-2000チップを採用

24ビット・カラーのXGA画像1枚は，無圧縮で2.25Mバイト（18Mビット）の容量があります．採用するUWBチップセット（XS110）の実効スループットが66Mbps（60%）と仮定しても，無圧縮では3.7フレーム/sのフレーム速度しか実現できません．30フレーム/sを達成するためには，少なくとも容量比で1/8に圧縮する必要があります．

DCT（離散コサイン変換）を用いる古典的なJPEGの場

合，8×8ピクセルのブロックごとに圧縮処理が行われます．このとき，1,024ピクセル×768ピクセル×30フレーム/sでは，1ブロック当たり2.7μsで処理しなければならず，ソフトウェアでの実現はかなり厳しくなります．

実測してみるとブロック当たりの圧縮処理は，MIPS4000系（動作周波数200MHz）で約80μs，ARM7（同80MHz）では約500μsを要し，処理速度が1けた以上足りません．したがって，ハードウェアによる圧縮支援機構が必須となりました．しかし，DCTを用いるJPEG処理用の単体チップが市販されておらず，消去法的にJPEG-2000 CODEC LSIを搭載することになりました．ウェーブレット変換を使ったJPEG-2000はDCTを用いるJPEGに対し，高周波成分を多く含む人工画像（スプレッド・シートやプレゼンテーション）における文字の可読性においても有利であろうと判断しました．

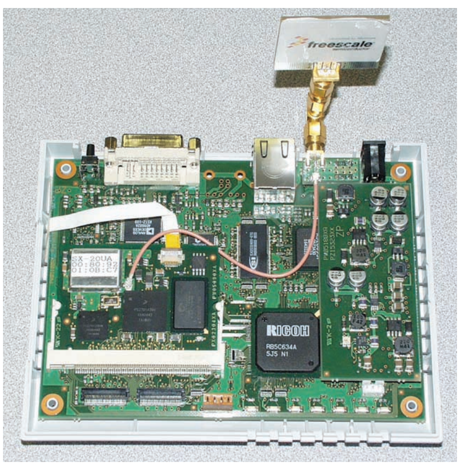


写真1　SX20UA-EVK-C キャプチャ・ユニット

2　開発したシステムの構成

試作機のブロック図を**図2**に，キャプチャ・ユニットの外観を**写真1**に示します．CPUとしては，動作周波数が166MHzのARM922Tコアのほか，10/100BASE-T（MAC/PHY），PCIホスト，メモリ・コントローラなどを内蔵した米国Micrel社の「KS8695P」を採用しました．このCPUは，すでに自社製品で採用実績のあったものです．

JPEG-2000 CODEC LSIにはリコーの「RB5C634A」を採用し，ビデオ・インターフェースは米国Altera社のFPGA「Cyclone（EP1C6F256，5980ロジック・エレメント）」で実現しています．送信側（キャプチャ・ユニット）と受信側（ディスプレイ・ユニット）の構成はほとんど同じですが，ビデオ信号に対するインターフェース回路が異なっており，直接の互換性はありません．UWBモジュールはmini-PCIバス上に装着し，必要に応じてほかの無線方式と交換できるように配慮しました．

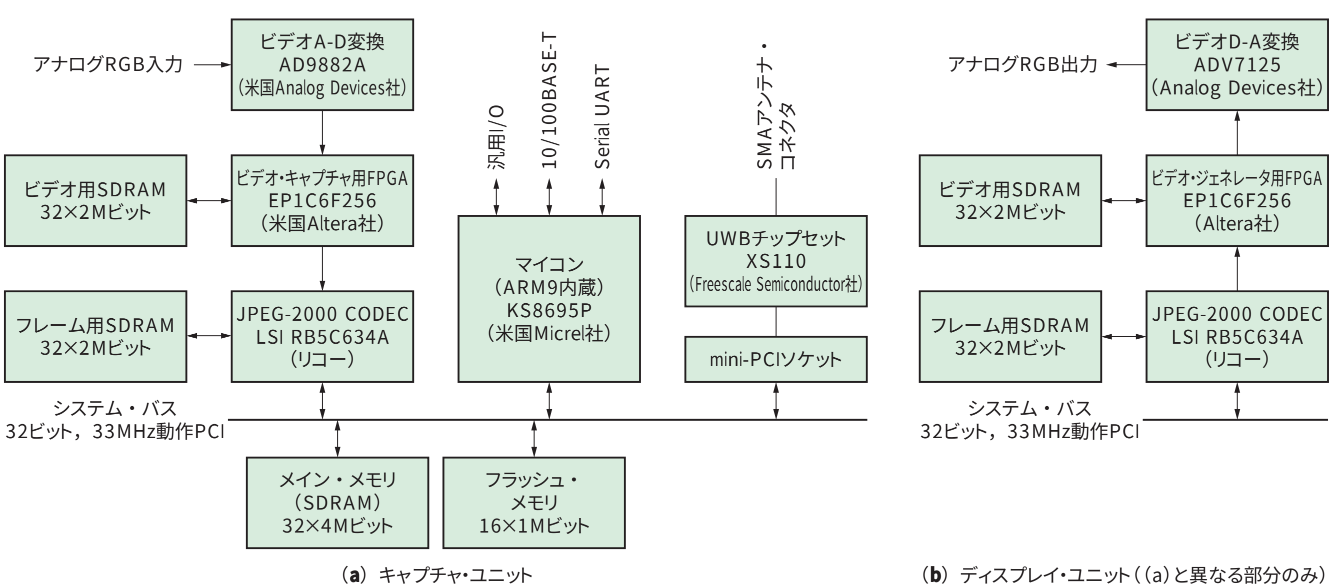


図2　試作機のブロック図

CPUは，自社製品で採用実績のあった米国Micrel社の「KS8695P」を採用．動作周波数が166MHzのARM922Tコアのほか，10/100BASE-T（MAC/PHY），PCIホスト，メモリ・コントローラなどを内蔵している．

0 1	2 3	4 5 6 7	8 9 a b	c d e f
0xee 0xee	Code	Frame number	Retry count	Sequence number
End of sequence #		Offset	Length	Checksum

0xee 0xee ： 先頭はかならず0xee 0xee（XS110依存）
Code ： 表2を参照
Frame number ： フレーム番号
Retry count ： 再送信カウント
Sequence number ： シーケンス番号（フレームごとに0からスタート）
End of sequence # ： 分割したデータの最終シーケンス番号
Offset ： データのオフセット値
Length ： データ長（パケットに乗っているデータ長）
Checksum ： チェックサム

図3
パケット・ヘッダの構造
JPEGデータはフレーム当たり数十Kバイト～数百Kバイトに達するため，1パケット（XS110では最大32Kバイト）には収まらず，簡単なシーケンス制御用のヘッダを付加してある．

● ドライバの開発がネックになりやすい

組み込み機器においては，いつでもデバイス・ドライバの開発がネックになります．今回のケースでも，UWBチップセット（XS110）やJPEG-2000 CODEC LSI（RB5C634A）ともに開発経験がなく，いきなりターゲット・ボードを用いてドライバの開発を行いました．

CPUはMMU（memory management unit）を内蔵したARM922Tコアなので，必要であればLinuxを移植することもできました．しかし，消費メモリ量やリアルタイム性から見てLinuxには不利な点が多いことと，何より開発時間の短さから本プロジェクトのOSとしてはすでに今回のCPUに移植済みであった自社製のリアルタイムOS「CREAM」を採用しました．

● データ構造とデータ・フロー

今回はポイント・ツー・ポイント（2点間接続）を用いるため，相互接続性などはあまり考慮しないことを前提としています．そこで，UDP/IP（user datagram protocol/internet protocol）などのトランスポート層は実装せず，JPEGデータをそのままUWBフレームに乗せています．ただし，JPEGデータはフレーム当たり数十Kバイト～数百Kバイトに達するため，1パケット（XS110では最大32Kバイト）には収まらず，簡単なシーケンス制御用のヘッダを付加してあります（図3，表2）．

送信側（キャプチャ・ユニット）のFPGAはA-Dコンバータを介してVGA信号を受け取り，これをビデオRAMに展開してJPEG-2000 CODECに渡します．JPEG-2000の圧縮が終わるとCPUに割り込みをかけます．CPUは圧縮済みのフレーム・データを受け取ってダブル・バッファに展開します．JPEG-2000のフレームはUWBチップセットのパケット・サイズごとに分割され，ヘッダを付加して送信されます．

表2　パケット・コード一覧

名　称	コード	内　容
UWBH_CODE_DATA	0x0000	フレーム送信
UWBH_CODE_DATA_ACK	0x0001	DATAに対するACK
UWBH_CODE_RXREPORT	0x0002	受信状態レポート
UWBH_CODE_XS110_INIT	0x0003	初期化パケット
UWBH_CODE_BRIDGE	0x0004	ブリッジ・モード
UWBH_CODE_PKTCHK	0x00fe	——
UWBH_CODE_TEST	0x00ff	——

受信側（ディスプレイ・ユニット）では受信パケットのヘッダを参照し，シーケンス番号からオフセットを算出してダブル・バッファ上にJPEG-2000のフレームを再構成します．シーケンスの欠損が検出された場合，その部分のデータは未受理として残され，次回の再送時に埋められることが期待されます．JPEG-2000のフレームが完成すれば，CPUはダブル・バッファのアドレスをJPEG-2000 CODECに渡してデコードおよび表示を指示します．もし再送シーケンス後にもフレームが未完成だった場合は，そのデータは不完全なものとして捨てられ，同じバッファ上に次のフレームの受信作業が開始されます．

本システムにおけるデータの流れを図4に示します．

● 欠損補完の方式を変えないと性能が出なかった

当初，受信側が1フレーム分のパケットを受け取った後，欠損したシーケンス番号のマッピングをACKパケットとして返送し，再送を促すことで欠損パケットの補完を行う予定でした．しかし実験してみると，UWBチップセットの送信遅延が非常に大きいことがわかりました．ACK送信をかけてから実際にACKが届くまで最大十数msも遅れてしまうため，「ACKを待ってから次のフレーム送信を開始する」という方式ではまったく性能が出ないことが明らかになったのです．

そのため，いささか場当たり的ながら「1フレーム当たり

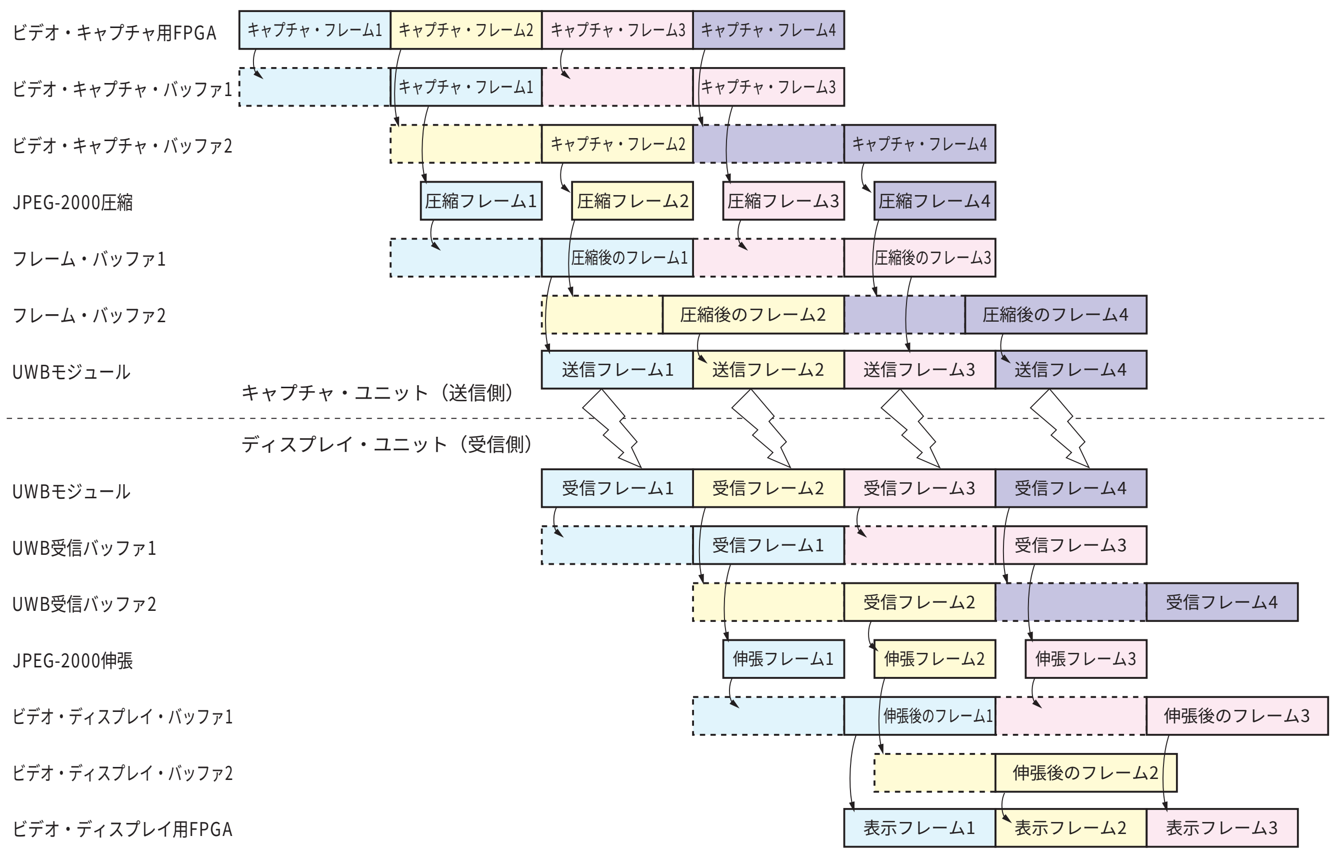


図4　データ・フロー
キャプチャ・ユニットとディスプレイ・ユニットの間のデータの流れを示す．

2回スキャンして，すべてのデータを2重に送信する」という実装になっています．ACKを待って欠損補完するよりも，ACKを待たずに2回目のフレーム送信を開始したほうが高い性能が得られたため，実際にはACK処理は使用されていません．

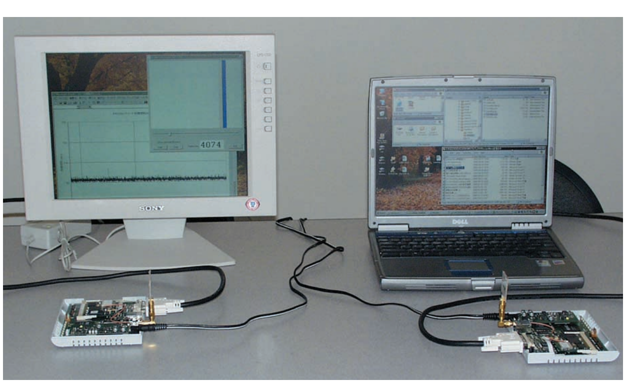


写真2　テスト中のUWB-XGAシステム

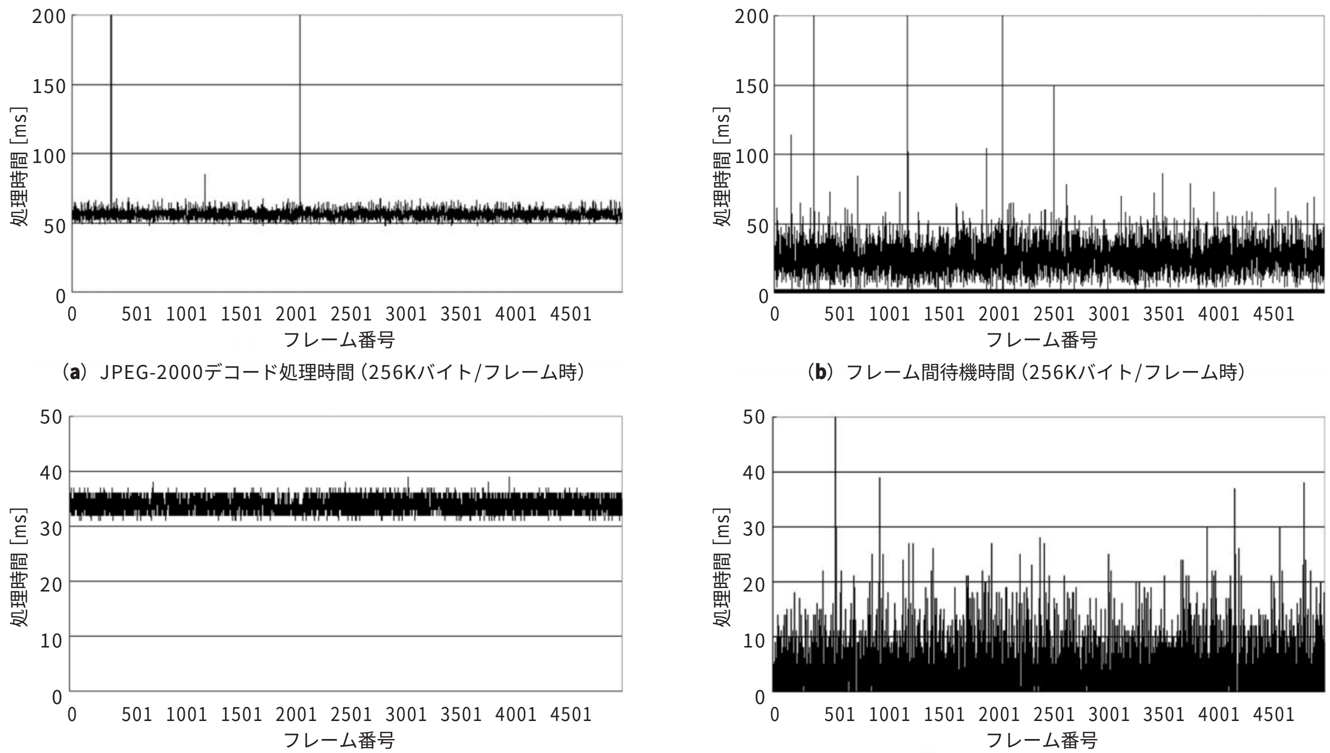
3　性能評価と製品展開への指針

本システムについて性能評価を行いました（**写真2**）．

● データ転送のオーバヘッドがボトルネック

実測性能は最大25フレーム/s（64Kバイト/フレーム＝3％圧縮時）でした．コンセプト・モデルとしてのデモンストレーション動作には耐えうるものの，目標値30フレーム/sに対し，わずかに届かない結果となりました．32ビット幅のSDRAMが接続されているとはいえ，本システムで使用したCPUのバルク・データ処理能力は決して高くはありません．加えて，1本のPCIバス上に三つのバス・マスタ（CPU，UWB，JPEG）が共存することもあって，今回のハードウェアにおいてはデータ転送のオーバヘッドがボトルネックになっています．

UWB無線通信部のスループットは，パソコンをプラッ



(a) JPEG-2000デコード処理時間(256Kバイト/フレーム時)
(b) フレーム間待機時間(256Kバイト/フレーム時)
(c) JPEG-2000デコード時間(64Kバイト/フレーム時)
(d) フレーム間待機時間(64Kバイト/フレーム時)

図5　デコード時間とフレーム間待機時間のばらつき
デコード処理の時間は，ほぼ一定している．これに対してフレーム間待機時間は非常に大きなばらつきを見せている．

トホームとしたテストで70Mbps前後，本システムのCPU上では50Mbps前後を実測しています．画質設定を「中(middle)」に設定して256Kバイト/フレームとすると，1フレーム当たり256K×8×2(2重送信するため)＝4Mビットを消費し，計算上12.5フレーム/sでUWB無線通信部が飽和することになります．画質を変化させた場合のフレーム速度の実測値を**表3**に示します．

表3　フレーム速度の実測値

画　質	フレーム容量(バイト)	フレーム速度(フレーム/s)
低	64K	25
中	256K	10
高	1M	5

● フレーム間隔のゆらぎ

本プロジェクトは「主としてプレゼンテーションなどのスライド表示を主目的とする」として始まったものですが，デモンストレーションでは見栄えの良い動画表示を多用することになり，フレーム速度だけでなくフレーム間隔の平均化が問題となりました．少なくともGOP(group of picture)ごとのバッファリングを前提としたMPEGベースのシステムと異なり，送信側と受信側合わせて4フレームしか保持しない本システムでは，通信時間遅延がそのまま動画の「引っかかり」として認識されます．

図5にJPEG-2000デコード時間(1フレームのデコード開始から終了までの時間)と，フレーム間待機時間(1フレームのデコードを終えてから次のフレームのデコードを開始するまでの時間)の実測データを示します．デコード時間は(例外的なスパイクを除けば)ほぼ一定していますが，これに対してフレーム間待機時間は非常に大きなばらつきを見せています．

例えば64Kバイト/フレーム×25フレーム/sであれば1フレーム当たりに許される処理時間は40ms，そのうち約35msがJPEG-2000デコードに消費されるため，フレーム間待機時間を5ms以内に抑えなければなりません．**図5**を見ると，処理件数の約23％が5msを超えており，大きなものは20msを超えています．

このジッタ(ゆらぎ)にはタイマ割り込み処理などの要因も含まれますが，かなりの部分がUWBの送受信に伴うレ

イテンシ変動に由来していることが判明しています．しかし，遅延の主要因が送信側なのか受信側なのかを特定するには至っていません．

● DS-UWB，マルチパスやピコネットの認識に課題あり

距離を変化させた場合のパケット・エラー率を測定した例を図6に示します．アンテナの配置状況や乱反射によるマルチパスの条件によっても通信特性は変化しますが，今回のテスト条件下では6m付近を境界として急激にエラー率が上昇しています．倉庫のように広い（マルチパスの少ない）場所では10m前後まで通信できた例もありますが，一般的な室内では3～5mが実用通信距離のようです．また今回用いたUWBチップセットはマルチパスに弱いと同時に直接波損失にも弱く，アンテナ見通し間に金属物や人体が介入してもエラー率が急増します．

今回用いたUWBチップセットは，IEEE 802.15.3に準拠したピコネット・ベースのMACを搭載していますが，それゆえピコネット認識に失敗するとまったく通信ができません．ピコネットへの参入・脱退など，状態遷移はBluetoothでも問題になった部分ですが，本UWBチップセットはファームウェアがβ版だったこともあり，ピコネット機能が不安定で，起動してからピコネットが安定するまで数十秒を要したり，なんらかの原因でピコネットを見失い，再起動を強いられるといったことも起こりました．

アンテナとのチューニングやMACファームウェアの改良にもよるでしょうが，2005年末時点での本UWBチップセットを搭載したシステムは，一般家庭やオフィスで使用する製品として販売するにはかなり厳しいと考えました．

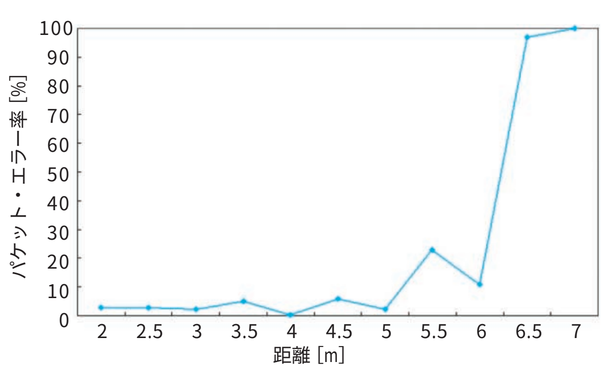


図6 距離対パケット・エラー率
今回のテスト条件下では6m付近を境界として急激にエラー率が上昇している．

● UWB対応機器の製品化に向けての問題点を洗い出す

本システムによって，高速な静止画圧縮技術と広帯域の無線ネットワークを組み合わせれば，動画圧縮技術を用いなくても動画のディジタル無線転送が可能となることが実証できましたが，さまざまな課題が残されています．

まず上述したように，実用に耐える画質を得るためにはデータ処理能力を根本的に高める必要があります．またハードウェアも合理化し，より安価で，かつ高速に画像データを扱える構成にしなければなりません．

今回採用したUWBチップセットは確かに，「IEEE 802.11系の無線LANより設定が少なくて済み，かつ高速である」ということは実証できたものの，安定性や速度とも不満の残る結果となりました．Freescale Semiconductor社の次世代UWBチップセットである「XS660」に期待していたのですが，XS660は2006年8月時点でいまだサンプル供給に至っていません．またDS-UWB方式は，後述する周波数規制の問題がクリアできなければ国内で販売できないという問題もあります．製品に近いシステムは，

1）より集積度が高く合理的な基礎ハードウェアの開発
2）安定度，速度性能ともに高く，かつ日本の周波数事情に応じたUWBチップセットの選択

という二つの条件を満たすことが必須です．

● 無線システムとしての発展，可能性の高い方式を模索

本プロジェクトが発足した時点では，「日本でも2～3年以内にUWBに対する法整備が整い，その規定範囲は米国FCC（連邦通信委員会）のUWBマスク（3.1GHz～10.6 GHz，－41.3dBm/MHz）に準拠したものになるであろう」と予測されていました．しかし，実際には米国内の規格（FCC）よりも，グローバルな規格であるITU（国際電気通信連合）の制定進行に沿う形で検討が行われました．

2006年8月，最終的に発表された総務省のUWBマスクは「3.4GHz～4.8GHzのローバンドは干渉軽減機能の実装が必須（ただし，4.2GHz～4.8GHzについては2008年12月末日までの期限付きで使用可能），ハイバンドは7.25GHz～10.25GHz」という予想以上に厳しいものでした．とくに3.1GHz～4.8GHzのローバンドを目いっぱいに使うDS-UWB方式にとっては致命的です．この時点ではMB-OFDM陣営のチップ開発もかなり進展しており，筆者らが今後のUWB開発をMB-OFDM方式に転換する一つの契機となりました．

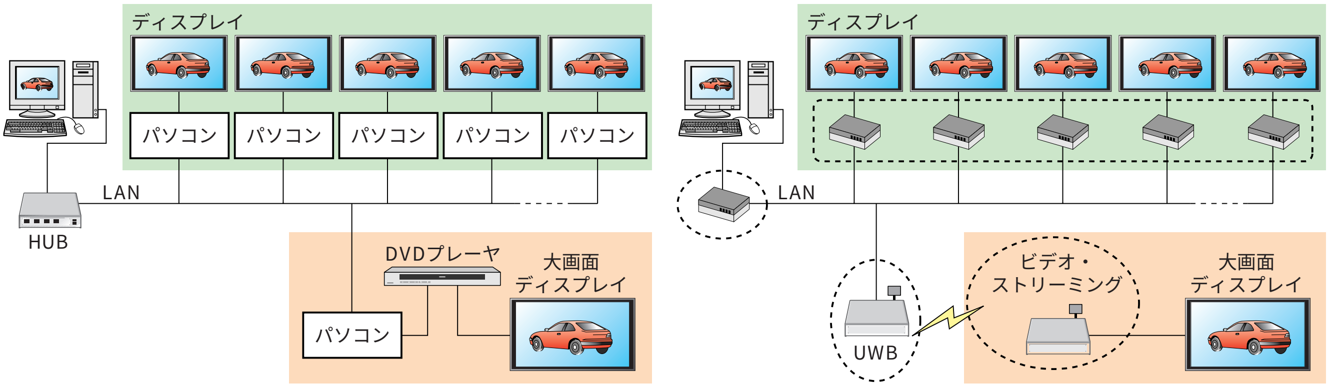


図7　UWBの画像配信への応用

筆者らが提案するシステムは，アナログVGA端子からの出力をリアルタイムで圧縮し，ネットワークへ伝送する機能を持つ．そのため，パソコン1台からの映像出力をそのままネットワークで配信可能．また配線が困難な所にはUWBで無線接続することもできる．

しかし，干渉軽減機能についての具体的な規定は2006年8月時点でまだ定義されていません．実運用環境で干渉軽減機能が働いた場合，伝送速度や接続安定性に及ぼす悪影響についても不安が残されています．できれば干渉軽減機能の実装という制約のないハイバンドを使いたいところですが，さすがに7GHzを超える帯域で動作するチップが出荷されるまでには，まだ時間がかかりそうです．

また，相互接続性がもっとも重要視されるWireless USBとしての用途ならともかく，ポイント・ツー・ポイント接続の画像伝送ではとくにWiMedia Alliance規格との互換性に固執する必要もありません．筆者らは，とくに通信方式にはこだわらず，より有効な技術を模索していきます．

● 画像配信システムとしての発展は見込める

総務省令が施行されるまで，国内では実験局の認可を取得しなければUWBの電波放射を行うことができませんでした．そのため，客先でのデモンストレーションの代替案として100BASE有線LANを用いて画像伝送を行うシステムを試作したのですが，これが意外と好評を博しました．

従来のネットワーク画像伝送システムの多くはMPEGなどの動画ストリーミング配信がその主流を占めており，本システムのように「同軸ケーブルやビデオ・ケーブルの信号をそのまま圧縮してネットワークに流す」という単純なシステムはありそうでなかったのです．

MPEGは確かに優れた動画圧縮技術ですが，圧縮伸張（とくに圧縮側）に多大なマシン・パワーを要するうえ，普及品のエンコーダでサポートされている解像度は一般的に640×480ピクセル程度が上限です．でき合いの動画コンテンツを表示するためには，従来はプレーヤ（パソコン）からの画像出力を延々と同軸ケーブルで引き回すか，あるいは表示器のすぐ近くにプレーヤを置き，ネットワーク配信やICカードの形で動画ファイルそのものを配布するしかありませんでした（**図7（a）**）．

本システムはアナログVGA端子からの出力をリアルタイムで圧縮しネットワーク伝送する機能を持つため，パソコン1台からの映像出力をそのままネットワークで配信できます．また吊り下げ型ディスプレイのように配線が困難な所には，配線の最終部分をUWBとして無線化することもできます（**図7（b）**）．

本プロジェクトが当初目ざした「オフィス・プロジェクタの無線接続化」という課題については，いまだ原価コスト，技術レベル，市場規模などが未成熟で製品化には至っていません．しかし本プロジェクトによって示唆されたディジタル画像伝送の可能性は，Wireless USBばかりが注目されがちなUWBに新たな方向を示すものであり，いずれ有望な市場を形成するものと期待しています．

ささき・ゆうじ
サイレックス・テクノロジー（株）

<筆者プロフィール>
佐々木勇治．組み込みネットワーク・エンジニア．専門はTCP/IPだが，無線からUSBまで幅広く手がける何でも屋．現在は米国ユタ州のsilex technology americaに勤務．

2